

J-PARC DTL 用高周波窓の調査

INVESTIGATION OF AN RF WINDOW FOR THE J-PARC DTL

新井宇宙[#], 伊藤崇, 平野耕一郎
Sora Arai[#], Takashi Ito, Koichiro Hirano
Japan Atomic Energy Agency

Abstract

A drift tube linac (DTL) is used in the J-PARC linac. An event occurred in the DTL cavity where the arc sensor module frequently detected electrical discharges. The area of discharge was the ceramic surface of the RF window. When removed and checked, there were discharge marks on the vacuum seal material and ceramic. In addition, dust had accumulated inside of the DTL. Discharge marks were observed using a laser microscope. Melting marks were found on the surface of the vacuum sealant, and adhesions were found on the surface of the ceramic. The relative permittivity and $\tan\delta$ of the removed ceramics were measured using a cavity resonator. The relative permittivity did not change, but the $\tan\delta$ increased the longer it was used.

1. はじめに

J-PARC リニアックでは 3 MeV~50 MeV の加速に 3 台の Drift Tube Linac(DTL)を利用している。2023 年 2 月に DTL3 で、アークセンサーモジュールが空洞内の発光を検知した警報発報による運転停止が頻発した。原因究明のため、運転中の DTL3 内部をのぞき窓から小型 CCD カメラで撮影した結果、アークセンサーが発光を検知すると同時に、RF カプラーの高周波窓の真空側表面で発光していることが観測された。RF カプラーを取り外し観察したところ、高周波窓のセラミック材表面とセラミック材に接触している真空シール材の間で放電が発生していたことが判明した。

本稿では、放電が発生した高周波窓の表面観察及びセラミック材の特性測定の結果について報告する。

2. DTL 用 RF カプラーと高周波窓

J-PARC リニアックで利用している 3 台の DTL は、上流側から順に DTL1、DTL2、DTL3 と呼称している。DTL3 のパラメータを Table 1 に示す。各 DTL には 2 台の RF カプラーが取り付けられており[1]、運転電力はこれらの RF カプラーを通じて空洞に投入される。DTL3 では、

運転周波数 324 MHz の高周波が、上流側 RF カプラーから 550 kW、下流側 RF カプラーから 560 kW 空洞に入力され、空洞電力は 920 kW である。

RF カプラーを Fig. 1、その断面図を Fig. 2 に示す。RF カプラーは可動式の結合ループを有し、ループの挿入量によって、結合度を調整することができる。また、ループは水冷式冷却構造を持つ。DTL3 の RF カプラーは窓表面から 34 mm の位置にループがあり、結合度を上流側 1.28、下流側 1.28 に設定している。Figure 2 に示すよ

Table 1: The DTL3 Parameters

Tank diameter	561 mm	
Tank length	7323 mm	
Operating frequency	324 MHz	
Cavity power	920 kW	
Input power (2 RF Couplers)	Upstream	550 kW
	Downstream	560 kW
Beam energy	In	36.7 MeV
	Out	50 MeV
Average electric field	2.9 MV/m	

[#]araisora@post.j-parc.jp

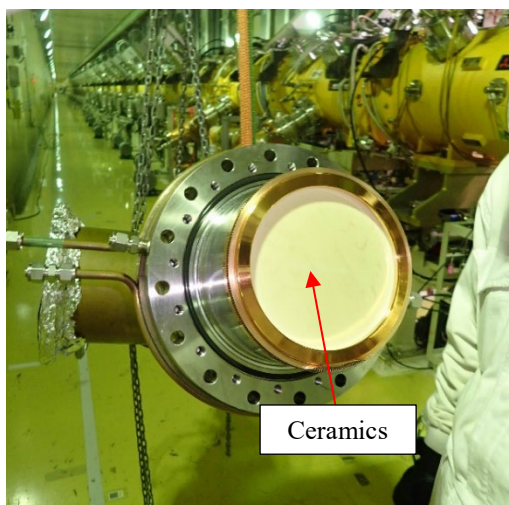
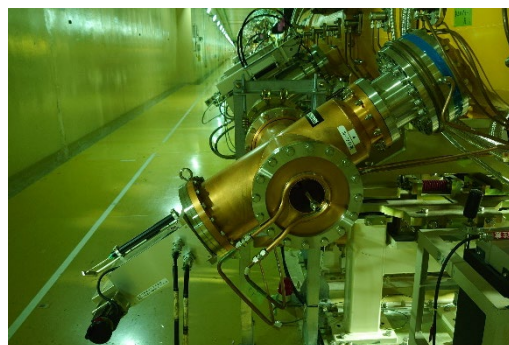


Figure 1: The RF coupler for the DTL.

うに、RFカプラーはDTL空洞の外壁のRFカプラーポートのフランジに固定され、RFカプラーのセラミックス材の位置は空洞の内壁面とほぼ同一面上になっている。セラミックス材は日本特殊陶業株式会社のHA997で、直径160mm、厚さ17mm、真空側表面には二次電子放出を抑えるために膜厚10nmのTiNコーティングが施されている。また、真空封止用の真空シール材には、Technetics社製のHELICOFLEX DELTAを使用している。RFカプラーと空洞の電氣的接触を取るためにRFコンタクターを使用している。

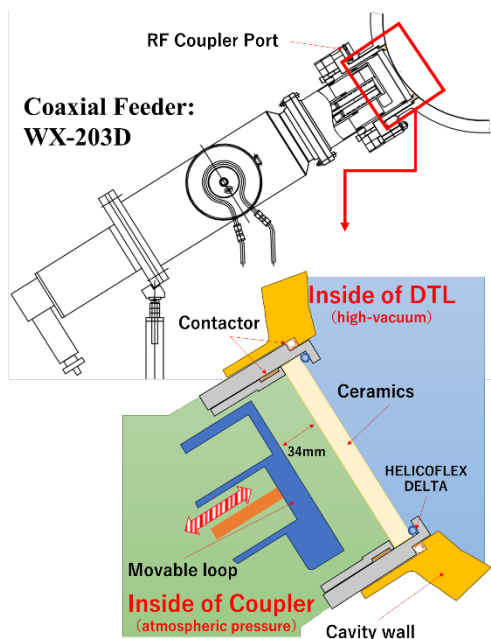


Figure 2: Cross-sectional view of the RF coupler for the DTL.

3. 高周波窓の放電現象

DTLには、空洞内部観察用ののぞき窓が数か所設けられている。このうち、上流側RFカプラーおよび下流側RFカプラー正面に設けられたのぞき窓にはアークセンサーが設置されており、空洞内部およびRFカプラーのセラミックス材表面を観測できる。アークセンサーはサムウェイ社製で、セラミックスのルミネッセンス発光に対応する波長に感度を有する[2]。

2023/2/1 から 2/28 の運転期間中、上流側のアークセンサーでは合計 36 回、一日に最大 27 回の放電を観測した。また、同期間中に下流側のアークセンサーでは 1 回だけ放電を観測した。アークセンサーによる警報が発報した時の DTL3 の空洞電力の検波波形(青色波形)の一例、及び定常運転中の検波波形(赤色波形)を Fig. 3 に示す。定常運転時の空洞電力は 100 μ s 程度で自然対数的に減衰するが、放電発生時は立下り幅 10 μ s 以下で空洞電力が急激に消失していることがわかる。また、アークセンサーによる警報発報時、加速空洞内の真空圧力が 1.4×10^{-5} Pa から 1.5×10^{-5} Pa まで増加していることをメタル電離真空計 GI-M2(ULVAC 社)で測定した。

以上のことから空洞内部で放電が発生したことが確認

できたので、次に放電部位を特定するため小型 CCD カメラをアークセンサーと同じ位置に並べて設置した。カメラを設置したのぞき窓の様子を Fig. 4 に示す。その結果、アークセンサーによる警報発報と同時にセラミックス表面での発光が観測された。

これらの結果から、DTL3 の放電はセラミック材の真空側表面で放電していることが判明した。

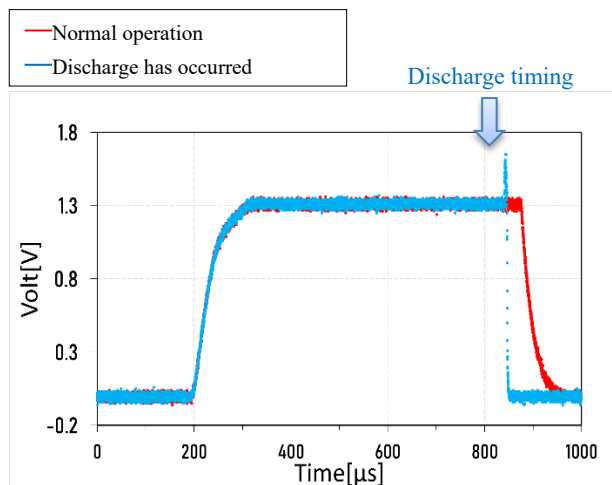


Figure 3: Cavity power waveform of the DTL3. The red graph shows the waveform for normal operation, and the blue graph shows the waveform when a discharge event occurs.

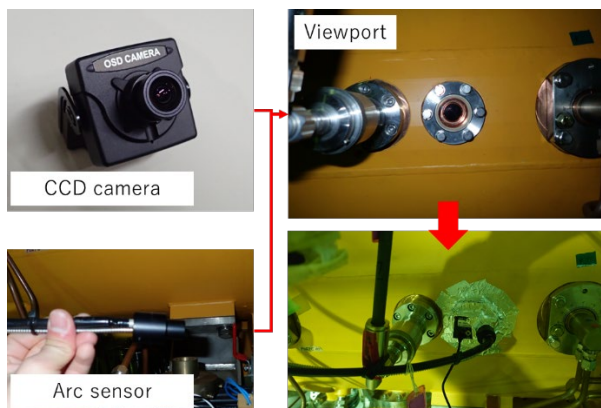


Figure 4: A camera and an arc sensor mounted on viewport.

4. セラミックス材表面及び空洞内部の観察

セラミック材表面で放電が発生していることから、RFカプラーのセラミックス材及び真空シール材の交換を 3/29 に行った。交換後の 4/1 から 4/30 の運転期間中は、放電の発生回数が合計 7 回と減少した。取り外したセラミックス材及び空洞内壁面の様子について述べる。

4.1 セラミックス材及び真空シール材の観察

セラミック材表面で放電が発生していることから、DTL3 の上流側および下流側の RF カプラーのセラミックス材の交換を行った。取り外した上流側 RF カプラーの真空シール材とセラミックス材の拡大写真を Fig. 5 に示

す。セラミックス材の TIN コーティング面は全体的に色が濃くなっていた。また、真空シール材及びセラミックス材の表面に放電痕と考えられる斑点が目視で確認できた。真空シール材の斑点は内側についており、セラミック材の斑点は真空シール材との接触面周辺についていた。上流側の真空シール材には約 80 カ所、セラミックス材には約 20 箇所の斑点があり、セラミックス材の斑点はすべて真空シール材の斑点と近い位置についていた。また、下流側では、真空シール材には約 10 カ所、セラミックス材には約 5 カ所の斑点があった。上流側は下流側より多くの放電が発生していたと推測される。また、RF コンタクターや、可動式ループの表面には放電痕らしき跡は見えなかったことから、セラミックス材の大気側表面では放電は無かったと考えられる。

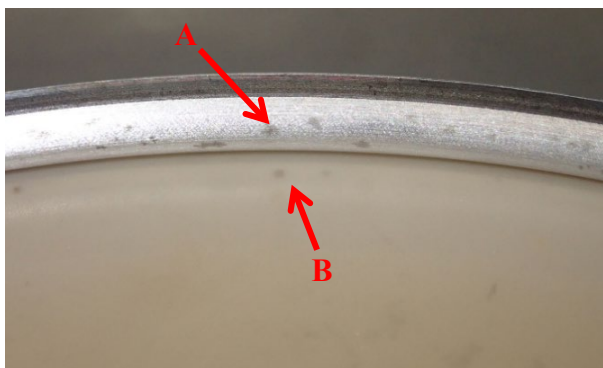


Figure 5: Ceramics and vacuum seals where electrical discharges were occurring.

4.2 DTL3 空洞内部の観察

上流 RF カプラー周辺の DTL3 内部の様子を Fig. 6 に示す。RF カプラーを取り外した際にファイバースコープを上流側の RF カプラーポートから空洞内部に挿入して観察したところ、RF カプラーポートの直下の空洞壁面にホコリが付着していることがわかった。Figure 6 の点線内の白い点はすべてホコリである。一方、下流側でも同様に埃が観察されたが、少なかった。ホコリがセラミックス

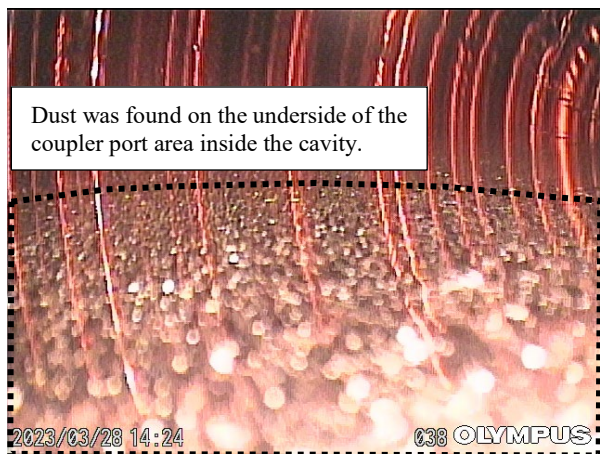


Figure 6: Photograph of the interior of the DTL3 cavity observed using a fiberscope. Dust is adhering to the underside of the coupler port area inside the cavity.

材に付着したことが放電に影響したと疑われる。埃はアルコールを添付したベムコットで拭きとった。

4.3 レーザー顕微鏡による変色箇所の観察

レーザー顕微鏡を用いて、交換した真空シール材とセラミックス材の観察を行った。Figure 5 の真空シール材表面の斑点 A を 50 倍で観察した結果を Fig. 7 に示す。Figure 7 に示す放電痕と考えられる斑点 A には、約 $4\ \mu\text{m}$ ~ $10\ \mu\text{m}$ ほどの凹凸があり、凹凸を中心として変色している様子が確認できた。図に示す凸は、滑らかで光沢があり、シール材表面を覆っているアルミニウムの外被が放電によって溶融したと考えられる。一方、画像に見られる横方向の一樣な溝は加工跡である。Figure 5 のセラミック材表面の斑点 B を 20 倍で観察した結果を Fig. 8 に示す。斑点の中心付近には、赤矢印で示す箇所に Fig. 7 の凸と似た光沢のある滑らかな突起が付着していることが確認された。しかし、他の場所についている斑点を同様の方法で確認したところ、10 カ所中 5 カ所では突起を確認することができなかった。突起の有無について原因は不明である。

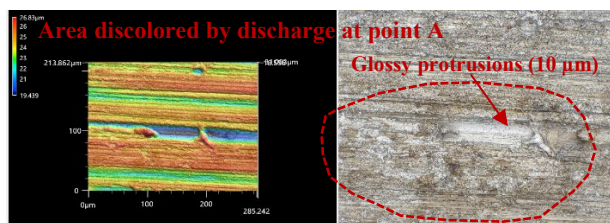


Figure 7: Observation of point A on the surface of the vacuum seal using a laser microscope.

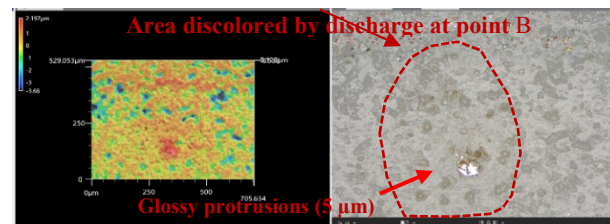


Figure 8: Observations of point B on the ceramic surface using a laser microscope.

5. セラミックスの高周波特性測定

空洞から取り出したセラミックス材の経年劣化について調べるため、空洞共振器を用いてセラミックス材の比誘電率と誘電正接($\text{Tan}\delta$)を測定し、未使用のセラミック材と比較した。測定に使用した空洞共振器を Fig. 9 に示す。測定に用いた空洞共振器は、外径 $137.5\ \text{mm}$ 、内径 $92.5\ \text{mm}$ 、長さ $33.05\ \text{mm}$ のアルミ製円筒空洞部を 2 個有する。それらの円筒部でセラミックス材を挟み、各円筒部の底面部からループ型プローブを差し込んで、TE111 モードの共振周波数と Q 値を測定した。空洞共振器で測定した共振周波数と Q 値から、3D 電磁界シミュレーションソフトの Ansys HFSS を用いて、比誘電率と $\text{Tan}\delta$ を求めた[3]。

測定したセラミックス材の試料は合計 7 個で、内訳は 2017 年、2019 年、2023 年の交換品が各 2 個(上下流用)

Table 2: Measured results in TE111 mode for ceramics. Resonant frequency and Q-value were measured using the cavity resonator. The relative permittivity and $\text{Tan}\delta$ were simulated by HFSS.

Mounted position	Exchange year	Use period	Resonance frequency (MHz)	Q value	relative permittivity	$\text{Tan}\delta (\times 10^{-5})$
Unused			1165.55 ± 0.01	9960 ± 70	9.89 ± 0.01	2.14 ± 0.07
Upstream side coupler	2017	7 years	1164.30 ± 0.04	8720 ± 510	9.91 ± 0.01	3.70 ± 0.72
Downstream side coupler	2017	7 years	1165.84 ± 0.01	9190 ± 140	9.88 ± 0.01	3.03 ± 0.18
Upstream side coupler	2019	2 years	1164.70 ± 0.02	9710 ± 60	9.91 ± 0.01	2.42 ± 0.07
Downstream side coupler	2019	2 years	1165.13 ± 0.01	9560 ± 120	9.90 ± 0.01	2.59 ± 0.14
Upstream side coupler	2023	4 years	1165.48 ± 0.02	9530 ± 50	9.89 ± 0.01	2.62 ± 0.06
Downstream side coupler	2023	4 years	1164.08 ± 0.01	9410 ± 120	9.92 ± 0.01	2.77 ± 0.15

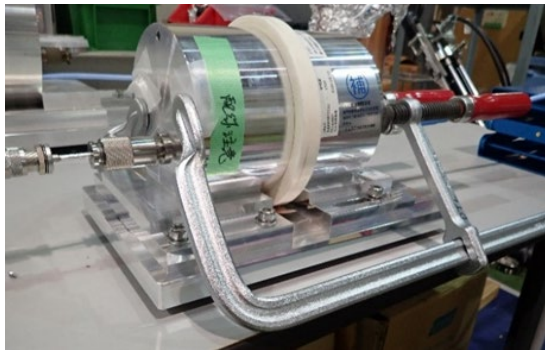


Figure 9: The photograph of the cavity resonator.

の6個、及び未使用品の1個である。それぞれの使用期間は2017年：7年間使用、2019年：2年間使用、2023年：4年間使用となっている。各セラミクス材につき4回の測定を行い、平均化した結果をTable 2に示す。今回の計測結果では比誘電率には長期間の使用による変化は見られなかった。一方で、 $\text{Tan}\delta$ は使用期間が長いほど増加しており、経年劣化していた。2023年に交換した4年間使用したセラミック材の $\text{Tan}\delta$ は、未使用品と比較して、上流側は約1.2倍、下流側は約1.3倍に増加していた。

6. まとめ

DTL3 空洞で発生した放電現象は、RF カプラーのセラミック材真空面側で発生していた。RF カプラーを取り外し観察した結果、真空シール材とセラミクス材に放電痕を確認した。

レーザー顕微鏡を用いて放電痕を観察すると、真空シール材表面には放電により融解した痕跡と考えられる表面の荒れや光沢のある凸が確認できた。セラミクス材表面には表面の荒れはなかったが、真空シール材表面に有った凸と類似した光沢のある突起を確認できた。

空洞内の埃がセラミクス材に付着して、放電の原因になったのではないかと推測される。セラミクス材交換後放電現象は減少した。

空洞共振器による比誘電率と $\text{Tan}\delta$ の測定では、比誘電率は未使用と使用後のセラミクス材で変化はなかった。一方で、 $\text{Tan}\delta$ は使用期間が長いほど増加する傾向が見られた。

今後は、セラミック材表面の変色箇所やレーザー顕微鏡による測定で確認した付着物について、SEM 分析及びEDS分析を行うとともに、二次電子放出係数の測定を行ってTiNコーティングの経年変化について調査する予定である。

謝辞

空洞電力の波形データは J-PARC リニアック RF グループの方々から頂きました。アークセンサーの調査には J-PARC リニアック空洞グループの根本氏、小坂氏にご協力を頂きました。セラミクス材の交換作業には KEK の南茂氏にご助力を頂きました。以上の方々に対し、改めて感謝を申し上げます。有り難う御座いました。

参考文献

- [1] F. Naito *et al.*, "INPUT COUPLER OF THE J-PARC DTL", Proceedings of LINAC2012, Israel, pp. 690-692.
- [2] Y. Saito *et al.*, "High Power Test of Microwave Window Using Resonant Ring", Proc. 27th Annual Symposium of Vacuum Society of Japan, 1987, pp. 406-410.
- [3] K. Hirano *et al.*, "RF DIELECTRIC PROPERTIES OF ALUMINA CERAMICS FOR L-BAND RF WINDOW", Proc. PASJ2021, 2021, pp. 226-228.